ZUR THEORIE
DES
LICHTELEKTRISCHEN STROMES IN GASEN.

INAUGURAL-DISSERTATION
ZUR
ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE
DER
HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT
DER
UNIVERSITÄT ROSTOCK

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

VORGELEGT
VON
ARTHUR PARTZSCH
AUS DRESDEN.

LEIPZIG.
JOHANN AMBROSIUS BARTH
1912

Referent: Prof. Dr. Heydweiller.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

§ 1.

Einleitung.

Stoletow[1]) und Righi[2]) haben gefunden, daß der lichtelektrische Strom zwischen parallelen Platten bei gleichbleibender elektromotorischer Kraft mit abnehmendem Drucke zuerst anwächst, einen Höchstwert erreicht und dann bis zu einem bestimmten Endwerte, dem Strome im äußersten Vakuum, abnimmt.

Stoletow[3]) erkannte schon folgende einfache Beziehung: Bedeutet v die Potentialdifferenz zwischen den parallelen Platten in Volt, l deren Abstand in Zentimetern, p_m den Druck in Millimetern Quecksilber, bei dem der lichtelektrische Strom seinen Höchstwert annimmt, so gilt folgendes Gesetz:

$$\frac{v}{l\,p_m} = \text{const.}$$

Aus seinen Versuchen ergibt sich für diese Konstante der Wert 372.

Die Erscheinungen bei verändertem Gasdrucke wurden in der Folge noch des öfteren sowohl in Luft, als auch in anderen Gasen untersucht. Hier sind besonders zu nennen die Arbeiten von v. Schweidler[4]), Lenard[5]), Varley[6]) sowie von Townsend[7]) mit seinen Schülern.

Townsend gelang es, auf Grund der Hypothese der Stoßionisation eine Erklärung dieser Vorgänge zu geben und

---

1) A. Stoletow, Compt. rend. **107.** p. 91. 1888.

2) A. Righi, Atti della Reale Acad. dei Lincei (2) **6.** p. 81. 1890.

3) A. Stoletow, Journ. de Phys. **9.** p. 468. 1890.

4) E. von Schweidler, Wiener Ber. **108.** p. 273. 1899.

5) P. Lenard, Ann. d. Phys. **2.** p. 359. 1900.

6) M. Varley, Phil. Trans. **202.** p. 439. 1903.

7) J. S. Townsend, The Theory of Ionization of Gases by Collision. London 1910. Daselbst nähere Literaturangabe.

eine Theorie des lichtelektrischen Stromes in Gasen zu entwickeln. Er zeigte, daß, wenn n_0 negative Elektronen an der negativen Platte durch das ultraviolette Licht ausgelöst werden, die Zahl n der Ionen, die die positive Platte erreichen, durch folgende Formel gegeben ist:

$$n = n_0 e^{\alpha l},$$

wobei α die Anzahl der durch Zusammenstöße eines negativen Ions beim Passieren einer Gasstrecke von 1 cm erzeugten Ionen bedeutet. Die Größe α hängt nur von der Feldstärke und vom Drucke des Gases ab. Bleiben diese konstant, so sind die Ströme i_1, i_2, i_3 . . ., die den Plattenabständen l_1, l_2, l_3 . . . entsprechen, bei gleichbleibender Lichtintensität durch folgende Gleichungen gegeben:

$$i_1 = i_0 e^{\alpha l_1}, \qquad i_2 = i_0 e^{\alpha l_2}, \qquad i_3 = i_0 e^{\alpha l_3}, \ldots\ldots$$

wobei i_0 den Strom im äußersten Vakuum bedeutet. Läßt man nun bei gleichbleibender Feldstärke und Druck die Abstände der Platten um gleiche Beträge zunehmen, derart, daß

$$l_2 - l_1 = l_3 - l_2 = l_4 - l_3 = \ldots$$

so folgt aus obiger Gleichung:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{i_3}{i_2} = \ldots = e^{\alpha (l_2 - l_1)} = \text{const.}$$

Das Verhältnis aufeinanderfolgender Ströme bleibt demnach konstant. Zum Beispiel fand Townsend in Luft für eine Feldstärke = 350 Volt/cm beim Drucke $p = 2{,}5$ mm Hg, daß sich die für Plattenabstände von 0,1, 0,3 und 0,5 cm beobachteten Ströme wie 1 : 2,06 : 4,22 verhielten. Es ist somit:

$$e^{0{,}2\,\alpha} = \frac{2{,}06}{1{,}00} = \frac{4{,}22}{2{,}06},$$

woraus sich α berechnen läßt. Auf diese Weise bestimmte Townsend für verschiedene Drucke und Feldstärken die zugehörigen Werte von α und fand, daß folgender funktionaler Zusammenhang besteht:

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{X}{p}\right).$$

Diese Funktion konnte Townsend auf Grund nachstehender Überlegung einfach darstellen:

Ein Ion, das sich unter der Feldstärke X durch ein Gas bewegt, möge zur Stoßionisation befähigt sein, wenn es eine

mittlere Ionisierungsspannung V frei durchlaufen hat. Diese Energie erhalte es auf der Wegstrecke λ_0, die der Beziehung Genüge leistet:

$$\lambda_0 X = V.$$

Ist nun λ die mittlere freie Weglänge des Ions in dem betreffenden Gase, so ist die Anzahl v der freien Weglängen pro Zentimeter, die größer als λ_0 sind, nach der kinetischen Gastheorie durch folgende Gleichung gegeben:

$$v = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{\lambda_0}{\lambda}}.$$

Dies ist zugleich auch die Anzahl α der von einem Ion auf der Strecke 1 cm durch Stoß erzeugten Ionen, da die zur Stoßionisation nötige Energie $\lambda_0 X$ auf diesen v Weglängen überschritten wird. Führt man in die letzte Gleichung obige Beziehung ein und drückt die freie Weglänge λ durch die Anzahl N der Zusammenstöße eines Ions beim Passieren eines Zentimeters eines Gases beim Druck 1 mm Hg und den herrschenden Druck p aus:

$$\frac{1}{\lambda} = Np,$$

so erhält man die von Townsend aufgestellte Gleichung:

$$\frac{\alpha}{p} = Ne^{-\frac{NVp}{X}}.$$

Townsend berechnete aus seinen Beobachtungen von α die in dieser Beziehung vorkommenden Konstanten N und V, und zwar bestimmte er sie so, daß die Formel mit den experimentellen Ergebnissen für die größeren Werte von X/p übereinstimmt. Er erhielt folgende Werte:

	Luft	N_2	H_2	CO_2	HCl	H_2O	A	He
Stoßzahl der Ionen N auf 1 cm bei 1 mm Hg	14,6	12,4	5,0	20,0	22,2	12,9	13,6	2,4
Mittlere Ionisierungsspannung V in Volt	25	27,6	26,0	23,3	16,5	22,4	17,3	14,5
NV Stoletowsche Konstante	365	342	130	466	366	289	235	34,8

Für kleine Werte von X/p sind die beobachteten Werte von α/p größer als die durch obige Formel gegebenen, doch zeigt sich für Wasserstoff und Stickstoff auch hier eine gute Übereinstimmung.

Der lichtelektrische Strom stellt sich also nach Townsend durch folgende Formel dar:

$$i = i_0 \, e^{lpNe^{-\frac{NVlp}{v}}},$$

wobei i_0 der Strom im äußersten Vakuum bedeutet und die Feldstärke X durch v/l ersetzt ist. Seinen Höchswert i_m erreicht der Strom bei dem Drucke p_m, für den die Beziehung gilt:

$$\frac{v}{l p_m} = NV = \text{const.}$$

Dies ist das von Stoletow erkannte Gesetz. Die Werte von NV in obiger Tabelle geben uns die Stoletowsche Konstante für die verschiedenen Gase. Der Maximalstrom i_m besitzt die folgende Größe:

$$i_m = i_0 \, e^{\frac{v}{Ve}},$$

er ist vom Plattenabstande unabhängig. Umgekehrt kann man aus vorstehender Gleichung die mittlere Ionisierungsspannung V bestimmen:

$$V = \frac{v}{e \cdot \log \frac{i_m}{i_0}}.$$

Der ursprüngliche Zweck dieser Arbeit war eine scharfe Bestimmung der Stoletowschen Konstanten. Wie schon Stoletow verfuhr, wurde bei gleich bleibendem Abstande der Platten und konstanter Potentialdifferenz der Druck variiert und der Maximaldruck p_m bestimmt. Hierbei zeigte es sich, daß sich der Maximalstrom viel geringer ergab, als nach der Townsendschen Formel zu erwarten war, eine Erscheinung, welche auch die von Stoletow[1]) veröffentlichten Kurven aufwiesen.

Es gelang, in vorliegender Arbeit eine theoretische Ergänzung der Townsendschen Formel zu geben, die die

1) A. Stoletow, Journ. de Phys. 9. p. 468. 1890.

Messungen viel befriedigender darstellte als die ursprünglichen Formeln Townsends. Außerdem wurden durch Bestimmung von NV und V die Townsendschen Werte einer Prüfung unterzogen. Die daraus erhaltenen Werte für N zeigen einen einfachen Zusammenhang mit der freien Weglänge der Gase, die Werte von V einen Zusammenhang mit dem elektrischen Verhalten derselben.

§ 2.

Theoretische Ergänzung der Townsendschen Formel.

Da sich für Potentialdifferenzen $v < V$ kein Maximum des lichtelektrischen Stromes nachweisen ließ (Stoletow fand in Luft bei 28,6 Volt kein Maximum des Stromes), so kommt für die Stoßionisation nicht der ganze Abstand l der parallelen Platten, sondern nur die Strecke $l(1 - V/v)$ in Betracht, da auf der Strecke $l\,(V/v)$ die zur Stoßionisation nötige Energie nur gesammelt wird, Stoßionisation aber nicht stattfinden kann. Die von Townsend aufgestellte Formel $n = n_0\, e^{\alpha l}$ geht in die folgende über:

$$n = n_0\, e^{\alpha l\left(1 - \frac{V}{v}\right)}.$$

Die Gleichungen für den lichtelektrischen Strom[1]) lauten nunmehr:

$$i = i_0\, e^{l\left(1 - \frac{V}{v}\right) p N e - \frac{N V p l}{v}},$$

$$i_m = i_0\, e^{\frac{v - V}{V e}},$$

$$V = \frac{v}{1 + e \log \frac{i_m}{i_0}},$$

während die Stoletowsche Beziehung:

$$\frac{v}{l p_m} = N V$$

bestehen bleibt.

---

1) Diese Formeln stellen den lichtelektrischen Strom in Gasen im Gebiete der Stoßionisation durch die negativen Ionen nur so lange dar, als die durch Ionenstoß erzeugten Ionen in Überzahl sind gegen diejenigen, die durch Rückdiffusion an die belichtete Platte und durch

Daß Townsend die anzubringende Korrektion $l(V/v)$ entging, liegt daran, daß bei seiner in der Einleitung geschilderten Beobachtungsweise von α diese Korrektion herausfällt. Bei gleichbleibender Feldstärke X vergrößerte er den Plattenabstand l_1 auf l_2. Dann sind die angelegten Potentialdifferenzen von folgender Größe:

$$v_1 = l_1 X, \qquad v_2 = l_2 X.$$

Das Verhältnis der zugehörigen Ströme i_1 und i_2 ist nach der korrigierten Formel:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{i_0 e^{\alpha l_2 \left(1 - \frac{V}{v_2}\right)}}{i_0 e^{\alpha l_1 \left(1 - \frac{V}{v_1}\right)}} = \frac{e^{\alpha l_2 \left(1 - \frac{V}{l_2 X}\right)}}{e^{\alpha l_1 \left(1 - \frac{V}{l_1 X}\right)}} = e^{\alpha (l_2 - l_1)}.$$

Dies ergibt sich aber auch nach der Towsendschen Formel.

Wendet man die für mittlere Ionisierungsspannung aufgestellten Formeln auf die von Stoletow mitgeteilten Messungen[1]) an, aus denen man für 100 Clark = 143 Volt $i_0 = 23{,}2$, $i_m = 97$, für 60 Clark = 85,8 Volt $i_0 = 22$, $i_m = 41$, ferner für 65 Clark = 92,9 Volt $i_0 = 49{,}5$, $i_m = 111$ entnehmen kann, so liefert die Townsendsche Formel folgende Ionisationsspannungen $V = 36{,}8$, 50,8 bzw. 42,4 Volt, während sich nach der korrigierten Formel die Werte 29,3, 31,9 bzw. 29,1 Volt ergeben. Man sieht aus diesen Zahlen, daß die nach der korrigierten Formel berechneten Zahlen eine gute Konstanz aufweisen und dem von mir bestimmten Werte der Ionisierungsspannung für Luft $V = 27{,}1$ Volt sehr nahe kommen, während die Ionisierungsspannung nach Townsend mit abnehmender Potentialdifferenz stark zunimmt.

Rekombination verloren gehen. Diese Verluste bedingen ja bei hohen Drucken, wo die Stoßionisation aussetzt, daß der Strom unter den im Vakuum beobachteten Wert i_0 fällt und beständig mit wachsendem Drucke abnimmt. Bemerkbar werden sich diese Verluste jedoch nur bei geringen Potentialdifferenzen v machen, die kein ausgeprägtes Maximum des lichtelektrischen Stromes aufweisen und ferner für höhere Potentialdifferenzen in den Druckgebieten, wo die Stoßionisation eben einsetzt. Von einer diesbezüglichen Korrektion wurde hier, wie bei Townsend, der Schwierigkeit wegen abgesehen.

1) A. Stoletow, Journ. de Phys. **9**. p. 470. 1890: Gezeichnete Kurve für 60 Clark und 100 Clark; p. 472: Zahlen für 65 Clark.

§ 3.

Versuchsanordnung.

Wie schon eingangs[1]) erwähnt ist, wurden die Messungen, die zwischen den beiden Formeln für den lichtelektrischen Strom entscheiden sollten, in ähnlicher Weise wie die Stoletows ausgeführt. Auch die Versuchsanordnung gleicht im wesentlichen der von Stoletow benutzten. Er ließ das ultraviolette Licht eines Lichtbogens auf die zur Messung dienende Zelle und auf eine weitere Zelle fallen, die unter konstanten Verhältnissen gelassen wurde und zur Kontrolle der ultravioletten Strahlung diente. Zwei Galvanometer von gleicher Schwingungsdauer und Dämpfung, welche die Ströme der beiden Zellen maßen, gestatteten, die Beobachtungen auf gleiche Lichtintensität zurückzuführen.

In der hier benutzten Versuchsanordnung stand die Meßzelle mit dem einen Quadrantenpaare eines umgebauten, mit Bernsteinisolation versehenen Mascartschen Quadrantelektrometers in Verbindung, während das andere an Erde lag. Die Papiernadel des Instrumentes hing an einem 0,01 mm starken Platin-Wollastondraht. Bei einer Hilfsspannung von 40 Volt an der Nadel und einem Skalenabstande von 230 cm lieferte 1 Volt 750 mm einseitigen Ausschlag.

Das mit der Meßzelle verbundene Quadrantenpaar lag durch einen Bronsonwiderstand an Erde.[2]) Der Widerstand folgt für geringe Potentialdifferenzen dem Ohmschen Gesetze und ist für die Dauer eines Versuchs von höchstens zwei Stunden als konstant anzusehen. Er befand sich in einem luftdicht verschlossenen Glasgefäß, was genügte, um ihn unabhängig von Temperaturschwankungen zu machen.

Als Kontrollzelle diente eine sehr empfindliche Kaliumzelle mit Quarzfenster. Ihr Auffangedraht lag an einer positiven Spannung von 280 Volt, später an einer solchen von 320 Volt. Das Kaliummetall stand mit einem Drehspulengalvanometer in Verbindung und war durch dieses und einen Hittorfschen Widerstand geerdet. Anfangs wurde ein Galvano-

---

1) Vgl. p. 6.

2) H. L. Bronson, Phil. Mag. (VI) 11. p. 143. 1906.

meter von $5{,}83 \cdot 10^{-9}$, zuletzt ein solches von $1{,}74 \cdot 10^{-9}$ Amp. Empfindlichkeit pro Skalenteil bei 200 cm Skalenabstand benützt.

Als ultraviolette Lichtquelle brannte in einer Entfernung von 20 bis 30 cm von der Meßzelle und der daneben befindlichen Kontrollzelle eine Quarzquecksilberlampe von Heraeus, die an einer Akkumulatorenbatterie von 100 bis 120 Volt lag.

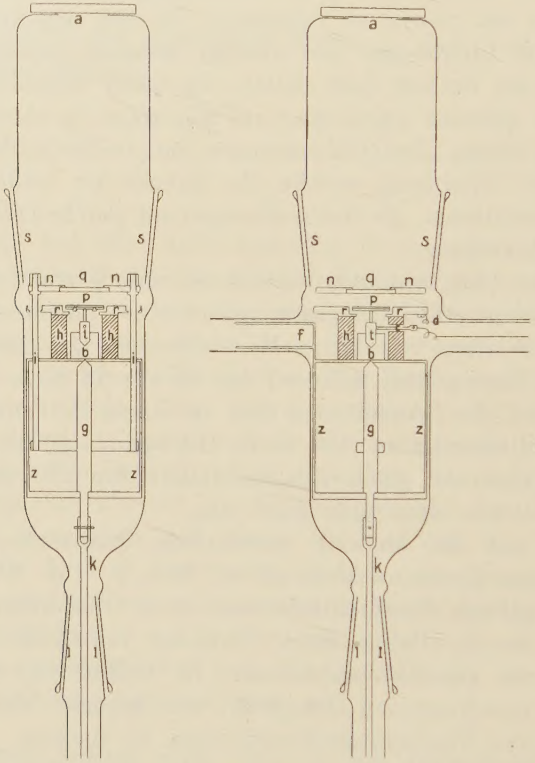


Fig. 1.

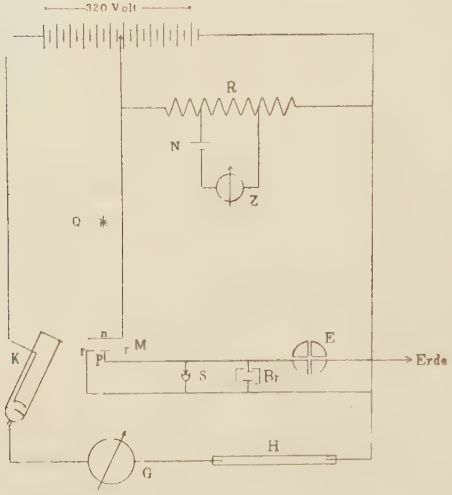
Die Lampe befand sich in einem Holzkasten mit einer Lichtklappe, die vom Beobachtungsplatze aus betätigt werden konnte. Durch einen Regulierwiderstand hielt man den Strom der Lampe während eines Versuches möglichst auf gleicher Höhe, so daß der Ausschlag des Drehspulengalvanometers angenähert konstant blieb. Gewöhnlich zeigte die Lampe bei 110 Volt

Batteriespannung eine Stromstärke von 1,5 Amp. und eine Klemmspannung von 80 Volt.

Die lichtelektrische Meßzelle war folgendermaßen eingerichtet (vgl. Fig. 1):

Ein mit einem großen, sehr gut schließenden und leicht zu öffnenden Schliff *s* versehenes, 6 cm weites und 30 cm langes Glaßgefäß nahm in seinem Innern den unten beschriebenen Kondensator auf. Am Ende des Schliffes *s* saß, auf eine plane Schliffläche mit weißem Siegellack aufgekittet, eine 4 mm dicke Quarzplatte *a* als Fenster für die ultraviolette Strahlung der Quecksilberlampe. Der zu belichtende Kondensator war als Schutzringkondensator ausgebildet und sorgfältig in Messing gearbeitet. Die lichtelektrisch empfindliche Metallplatte *p* besaß eine Platinoberfläche, um bei den Versuchen die Ermüdung möglichst gering zu halten. Um aber eventuell auch andere Metalle untersuchen zu können, wurde die Platte *p* auf dem Tisch *t* durch einen Bajonettverschluß festgehalten und konnte somit leicht ausgewechselt werden. Eine Bernsteinsäule *b* isolierte das Tischchen *t*, ein Zylinder *h* von Hartgummi den Schutzring *r* des Kondensators, der durch einen Draht *d* immer an Erde lag, genügend von ihrer Unterlage. Eine seitliche Durchbohrung des Hartgummiringes bei *c* ermöglichte eine Verbindung des Tischchens mit dem Quadrantelektrometer. Der Verbindungsdraht führte durch ein Stück Bernstein, das in einem geerdeten Messingrohr saß, durch einen Ansatz des Glasgefäßes nach außen. Der Messingzylinder *z*, den vier Messingfedern und ein seitlich eingeschraubter Stutzen *f* gegen Verschiebung und Verdrehung schützten, trug die Metallplatte *p* und den Schutzring *r* samt ihren Isolatoren. Er enthielt in seinem Innern die Stahlschraube *g*, deren Ganghöhe 0,52 mm betrug. Durch Drehen der Schraube bewegte sich die andere Platte *n* des Kondensators, die sich durch eine geeignete Führung parallel zu dem Schutzring verschieben ließ. Die Platte *n* des Kondensators besaß in der Mitte eine kreisrunde Öffnung von 20 mm Durchmesser, so daß nur die Platte *p*, die dieselben Dimensionen hatte, von ultraviolettem Licht getroffen werden konnte. Eine Quarzplatte *q*, mit Siegellack eingekittet, schloß diese Bohrung und lag mit dem umgebenden Messingring vollständig in einer Ebene. Messingring und Quarzplatte

wurden kathodisch mit Platin bestäubt. Die äußerst feine Schicht, welche vollkommen leitete, ließ genügend Licht hindurch und bildete sozusagen das Netz des belichteten Kondensators. Zwei Schrauben hielten die Platte *n* auf den Stiften *i*. Diese gingen, durch einen Luftraum von dem Schutzring *r* isoliert, durch enge Führungen an der Oberfläche des Zylinders *z*. So bestand zwischen *n* und *z* metallische Verbindung. Beide lagen an positiver Spannung, die der starke Messingdraht *k* zuführte. Er diente zugleich als Schlüssel der Schraube *g* und drehte sich leicht mit dem inneren Teile des Schliffes *l*, in den er eingekittet war, ohne daß das Vakuum in der Zelle



Es bedeutet:
M Meßzelle
n positive Platte
p belichtete Platte
r Schutzring
K Kontrollzelle
E Quadrantelektrometer
Br Bronsonwiderstand
S Erdungsschlüssel
G Drehspulengalvanometer
H Hittorfscher Widerstand
Q Quecksilberdampflampe
R Stöpselwiderstand
N Normalelement
Z Zeigernullinstrument.

Fig. 2.

gelitten hätte. Die Drehungen der Schraube las man an einer Teilung auf der Unterseite des Zylinders *z* ab.

Die Zelle saß mit einem Schliffe an der Glasanordnung und war von ihr durch einen Hahn abschließbar. Das Evakuieren der Zelle geschah mit einer großen Toepler-Hagenpumpe.

Den Druck bestimmte man mit einem Mc Leodschen Manometer, das dem von Zehnder[1]) beschriebenen Instrument nachgebildet ist. Es gestattete Drucke von 0,0001—20 mm

1) L. Zehnder, Ann. d. Phys. **10**. p. 623. 1903.

und mehr abzulesen. Die Skala war durch Auswägen mit Quecksilber geeicht worden.

Zur Ermittelung der an die Platte n gelegten Spannungen kompensierte man ein Normalelement. Ein Bild der elektrischen Meßanordnung gibt Fig. 2.

§ 4.

Darstellung der Gase.

Gemessen wurde in Luft, Stickstoff, Wasserstoff, Kohlensäure und Sauerstoff, sowie in Gemischen von Stickstoff und Wasserstoff und in solchen von Wasserstoff und Kohlensäure. Die Herstellung der Gase geschah auf folgende Weise:

1. Luft: Die Luft wurde über eine Woche lang in einer Flasche über Phosphorpentoxyd getrocknet.

2. Stickstoff: Käuflicher Bombenstickstoff, der durch 2—3 % Sauerstoff verunreinigt war, wurde durch eine Waschflasche mit Kalilauge, um etwa vorhandene Kohlensäure zurückzuhalten, langsam in die vorher ausgepumpte Reinigungsvorrichtung eingelassen. Hierauf evakuierte man wieder und füllte von neuem. Dies wurde zwei- bis dreimal wiederholt. Am Schluß ließ man den Druck im Innenraum um 5—10 cm Hg über den äußeren steigen. Obwohl die Anordnung dicht hielt, wurde auch noch diese Vorsichtsmaßregel getroffen, um jede Verunreinigung durch den Luftsauerstoff fernzuhalten. Nunmehr konnte der Stickstoff mit Hilfe einer Zirkulierpumpe (im Prinzip eine Toeplerpumpe mit einem weiten Glasrohre statt der Kapillaren) durch Heben und Senken des darin befindlichen Quecksilbers über festes Natriumhydroxyd, Chlorcalcium und Phosphorpentoxyd als Trockenmittel geleitet werden. Hierauf passierte das Gas ein langes Hartglasrohr mit Bündeln von Kupferdrahtnetz, die vier untergestellte Bunsenbrenner auf Rotglut erhielten, und gab hier den noch enthaltenen Sauerstoff ab. Der Stickstoff blieb so lange in Zirkulation, bis sich trotz stundenlangen Glühens ungebrauchtes Kupfer nicht mehr schwärzte. Um einen Schluß auf die Reinheit des Stickstoffs machen zu können, in dem natürlich noch Argon vorhanden war, untersuchte man die Beweglichkeit der negativen Ionen. Nach J. Franck[1])

1) J. Franck, Verh. d. D. Phys. Ges. 12. p. 613. 1910.

werden im Stickstoff außerordentlich hohe Geschwindigkeiten für die negativen Ionen gefunden. So beobachtete er für auf eine ähnliche Weise gereinigten Stickstoff als Höchstwerte der beobachteten Ionenbeweglichkeit Werte von 80—145 cm/sec pro Volt/cm, während ungereinigter Stickstoff eine Ionenbeweglichkeit von 1,84 cm/sec aufwies.

Die Ionengeschwindigkeit bestimmte ich mit der Rutherfordschen Wechselstrommethode. An der Platte *n* der Meßzelle lag städtischer Wechselstrom von ungefähr 110 Volt Effektivspannung und 50 Perioden in der Sekunde. Während in Luft bei einem Plattenabstande von 1,45 cm Stromlosigkeit eintrat, waren in Stickstoff bei einer Entfernung von 4,0 cm noch beträchtliche Aufladungen zu bemerken. Da nun die Ionengeschwindigkeit mit dem Quadrate des Abstandes zusammenhängt, bei dem keine Ionen mehr die gegenüberliegende Platte erreichen, so kann man folgern, daß die Ionengeschwindigkeit des hier verwandten Stickstoffs mindestens achtmal so groß war wie die der Luft, mit der verunreinigter Stickstoff in der Ionenbeweglichkeit übereinstimmt. Stromlosigkeit war nach dem Kurvenverlauf für ca. 6,0 cm zu erwarten, so daß sich für diesen Stickstoff eine Ionenbeweglichkeit von ca. 30 cm/sec ergeben hätte. Der Stickstoff war somit als genügend rein zu betrachten. Er zeigte im Dunkeln beim Bewegen des Quecksilbers in der Toeplerpumpe oder im Mac Leod ein Aufleuchten des Gases, was auch in gewissem Grade für seine Reinheit spricht. Vor jeder einzelnen Messung ließ man den Stickstoff in der Reinigungsanordnung zirkulieren.

3. Wasserstoff: Der Wasserstoff wurde durch Einwirkung von verdünnter Schwefelsäure auf Zink dargestellt und durch alkalische Kaliumpermanganatlösung, Kalilauge, alkalische Pyrogallollösung, konzentrierte Schwefelsäure und über Phosphorpentoxyd geleitet.

Ein Zeichen für die Reinheit des so dargestellten Wasserstoffs ist es, daß bei einem Abstande von 0,208 cm schon bei einer Potentialdifferenz von 249 Volt Glimmentladung einsetzte. Der dabei herrschende Druck war 6,09 mm Hg. Strutt[1]) hat

1) R. J. Strutt, Phil. Mag. 193. p. 377. 1900.

in Wasserstoff ein Minimumpotential von 302—308 Volt, Carr[1]) ein solches von 278 Volt beobachtet.

4. Kohlensäure: Die Kohlensäure wurde durch Einwirkung von verdünnter Salzsäure auf reinem Marmor dargestellt. Das Gas passierte eine Lösung von doppeltkohlensaurem Natron in Wasser, um mitgerissene Salzsäure zurückzuhalten. Als Trockenmittel diente konzentrierte Schwefelsäure und Phosphorsäureanhydrid.

5. Sauerstoff: Der Sauerstoff wurde durch Erhitzen von Kaliumpermanganat im Vakuum gewonnen und über Phosphorpentoxyd getrocknet.

§ 5.

Messungen.

Allgemeines.

In jedem der Gase wurden Messungen einmal bei gleichbleibendem Plattenabstande $l = 0{,}208$ cm und verschiedenen Potentialdifferenzen v, dann bei gleichbleibender Potentialdifferenz $v \sim 120$ Volt und verschiedenen Abständen ausgeführt.

Die einzelne Messung gestaltete sich wie folgt:

Durch geeignete Blenden vor der bis auf wenige Hundertel Millimeter Hg ausgepumpten Meßzelle wurde der Strom im Vakuum so eingestellt, daß der zu erwartende Maximalstrom noch auf die Skala zu liegen kam. Dann ließ man das zu untersuchende Gas in einer Menge zu, daß der Strom im Elektrometer unter den vorher im Vakuum beobachteten Wert fiel. Dann begann man, die Anordnung von neuem auszupumpen. Nach einem oder auch nach mehreren Pumpenzügen wurden Meß- und Kontrollzelle bestrahlt und die Ausschläge des Elektrometers und des Galvanometers beobachtet. Als Ausschläge der Instrumente betrachtete man die Differenz der Einstellungen im belichteten und im unbelichteten Zustande der beiden Zellen. Als Nullpunkt des Elektrometers galt also nicht die Einstellung bei geerdeten Quadranten, sondern die durch das Kontaktpotential im Bronson um einige Skalenteile gegen den Erdungspunkt verschobene Einstellung bei unbelichteter Meßzelle.

---

1) W. R. Carr, Proc. Roy. Soc. **71**. p. 374. 1903.

In den nun folgenden Tabellen sind der Raumersparnis wegen nicht alle ausgeführten Messungsreihen wiedergegeben. Die nicht angeführten Beobachtungsreihen, die ganz analog verliefen, sind wenigstens in der Zusammenstellung, die für jedes Gas gegeben ist, mit den Größen vertreten, die zur Bestimmung der mittleren Ionisierungsspannung und der Stoletowschen Konstanten dienen.

In den Tabellen bedeutet:

i der für jeden einzelnen Versuch auf eine bestimmte Lichtintensität reduzierte Strom,
i_0 der Strom im äußersten Vakuum,[1]) durch Extrapolation für den Druck $p = 0$ erhalten,
i_m der aus der Kurve der i entnommene Wert für den Maximalstrom,
p der Druck in Millimeter Hg,
p_m der Druck, bei welchem der Strom seinen Höchstwert annimmt,
l der Plattenabstand in Zentimetern,
v die angelegte Potentialdifferenz[2]) in Volt.

Für jedes der Gase ist zunächst eine Anzahl von Messungsreihen angeführt, dann folgt eine Zusammenstellung der erhaltenen Resultate. Hieran schließt sich die Bestimmung von N und V und eine Diskussion über die Ergebnisse. Zuletzt wird aus den Werten von N und V und aus dem Strom im äußersten Vakuum sowohl nach der Townsendschen als auch nach der in dieser Arbeit abgeleiteten Formel der lichtelektrische Strom berechnet und mit den Beobachtungsergebnissen verglichen.

1. Messungen in Luft.

1. Die für die mittlere Ionisierungsspannung V berechneten Werte,[3]) wie sie sich nach der in dieser Arbeit aufgestellten Formel ergeben, weisen im allgemeinen eine gute Konstanz auf, während die nach der Townsendschen Formel bestimmten Werte V' stark mit wachsender Potentialdifferenz abnehmen. Die für höhere Potentialdifferenzen als 120 Volt berechneten

1) Die einzelnen Werte für i_0 sind nicht miteinander vergleichbar, da im allgemeinen die Lichtintensität von Versuch zu Versuch durch Blenden variiert wurde.

2) An der angelegten Potentialdifferenz v ist eine kleine Korrektion angebracht, die der Aufladung des Elektrometers beim Maximalstrom entspricht. Betrug z. B. $i_m = 375$ Skt. bei einer Elektrometerempfindlichkeit von 750 Skt. pro Volt, so wurde von v 0,5 Volt abgezogen.

3) Vgl. Tab. 2.

Einzelne Messungsreihen in Luft.

Tabelle 1.

v = 20,17 Volt l = 0,208 cm		v = 26,5 Volt l = 0,208 cm		v = 28,5 Volt l = 0,208 cm		v = 30,6 Volt l = 0,208 cm	
p	i	p	i	p	i	p	i
4,70	2,75	8,90	2,47	6,40	2,97	0,761	4,15
2,67	3,03	5,16	2,89	3,62	3,34	0,575	4,18
1,49	3,26	2,99	3,20	2,07	3,63	0,449	4,18
0,700	3,49	1,67	3,51	1,26	3,90	0,340	4,16
0,372	3,62	0,962	3,69	0,812	4,14	0,082	4,02
0,277	3,61	0,737	3,77	0,601	4,19	0,038	3,99
0,210	3,66	0,552	3,81	0,445	4,23		
0,102	3,69	0,446	3,85	0,356	4,19		
0,056	3,71	0,331	3,85	0,205	4,15		
0,012	3,81	0,177	3,85	0,071	4,15		
i_0 = 3,81		i_0 = 3,85		i_0 = 4,145		i_0 = 4,00	
Kein Maximum zu beobachten		Kein Maximum zu beobachten		i_m = 4,22		i_m = 4,20	
				p_m = ~ 0,5 mm Hg		p_m = ~ 0,55 mm Hg	

v = 41,6 Volt l = 0,208 cm		v = 82,9 Volt l = 0,208 cm		v = 121,5 Volt l = 0,052 cm		v = 121,5 Volt l = 0,104 cm	
2,13	2,28	8,31	1,55	36,6	0,91	18,27	0,90
1,60	2,46	6,32	1,74	29,0	1,10	14,06	1,11
1,23	2,60	4,77	2,03	22,15	1,52	10,80	1,45
0,918	2,72	3,61	2,43	17,15	1,87	8,21	1,92
0,696	2,74	2,74	2,85	12,97	2,39	6,22	2,45
0,546	2,74	2,02	3,34	9,98	2.89	4,70	2,91
0,410	2,67	1,52	3,61	7,61	3,19	3,56	3,10
0,311	2,61	1,33	3,68	6,47	3,18	2,72	3,00
0,175	2,50	1,16	3,62	5,80	3,16	1,99	2,68
0,086	2,41	0,880	3,48	4,31	2,88	1,51	2,27
0,048	2,38	0,666	3,30	3,32	2,49	0,869	1,62
		0,462	2,79				
0,028	2,36	0,045	1,79	1,86	1,79	0,572	1,32
0,015	2,33	0,013	1,72	0,139	0,905	0,104	0,905
				0,029	0,89	0,028	0,86
i_0 = 2,31		i_0 = 1,70		i_0 = 0,885		i_0 = 0,845	
i_m = 2,78		i_m = 3,68		i_m = 3,19		i_m = 3,10	
p_m = ~ 0,63 mm Hg		p_m = ~ 1,3 mm Hg		p_m = 6,90 mm Hg		p_m = 3,47 mm Hg	

Tabelle 1 (Fortsetzung).

v = 163,5 Volt, l = 0,208 cm		v = 202,9 Volt, l = 0,208 cm		v = 242,8 Volt, l = 0,208 cm		v = 324,0 Volt, l = 0,208 cm	
p	i	p	i	p	i	p	i
17,0	0,604	18,05	0,40	21,4	0,16	18,26	0,13
13,0	0,732	13,82	0,55	16,42	0,23	14,05	0,27
10,0	0,995	10,58	0,85	12,55	0,40	10,77	0,61
7,58	1,42	8,07	1,39	9,56	0,73	8,21	1,30
5,78	2,12	6,11	2,30	7,37	1,33	6,30	2,23
4,40	3,06	4,67	3,47	5,57	2,14	4,77	2,92
3,31	3,92	3,51	4,42	4,24	2,87	4,16	2,97
2,48	4,34	2,67	4,62	3,16	3,09	3,56	2,87
2,17	4,36	2,00	4,11	2,41	2,68	2,72	2,22
1,87	4,19	1,51	3,21	1,77	1,98	2,05	1,38
1,40	3,58	1,13	2,35	1,37	1,35	1,53	0,76
1,07	2,86	0,863	1,68	1,01	0,89	1,16	0,40
0,290	1,05	0,135	0,48	0,325	0,25	0,498	0,099
0,041	0,68	0,038	0,41	0,139	0,18	0,069	0,040
0,019	0,63	0,015	0,40	0,011	0,14	0,012	0,036
i_0 = 0,63		i_0 = 0,395		i_0 = 0,14		i_0 = ca. 0,036	
i_m = 4,40		i_m = 4,64		i_m = 3,12		i_m = 2,97	
p_m = 2,30 mm Hg		p_m = 2,90 mm Hg		p_m = 3,43 mm Hg		p_m = 4,30 mm Hg	

Zusammenstellung der Ergebnisse in Luft.

Tabelle 2.

Potentialdifferenz in Volt v	Plattenabstand in Zentimetern l	Strom im Vakuum i_0	Maximalstrom i_m	$i_m : i_0$	Mittlere Ionisierungsspannung V	Mittlere Ionisierungsspannung n. Townsend V'	Maximaldruck p_m	Stoletowsche Konstante NV
20,17	0,208	3,80	—	—	—	—	Kein Maximum	
26,5	0,208	3,85	—	—	—	—	Kein Maximum	
28,5	0,208	4,14	4,22	1,019	27,5	485	~0,5	—
30,6	0,208	4,00	4,20	1,05	27,0	227	~0,55	—
41,6	0,208	2,31	2,78	1,19	28,3	88	~0,63	~320
82,9	0,208	1,70	3,68	2,16	26,8	39,6	~1,3	~306
123,0	0,208	1,015	3,88	3,77	26,7	34,1	1,73	343
163,5	0,208	0,63	4,40	6,99	26,0	31,0	2,30	342
202,9	0,208	0,395	4,64	11,75	26,4	30,4	2,90	337
242,8	0,208	0,140	3,12	22,3	25,7	28,8	3,43	340
285,0	0,208	0,066	2,67	40,5	25,8	28,4	4,00	342
324,0	0,208	0,036	2,97	82,5	25,0	27,1	4,30	362
121,5	0,052	0,885	3,19	3,61	27,1	34,8	6,90	339
121,5	0,104	0,845	3,10	3,67	26,8	34,4	3,47	337
121,5	0,208	0,830	2,99	3,605	27,1	34,9	1,74	336
121,5	0,416	0,810	2,925	3,615	27,1	34,8	0,89	329

Werte von V besitzen eine geringere Genauigkeit, da der zur Berechnung dienende Strom im äußersten Vakuum nur 52 Skalenteile bei 160 Volt bis herab zu 2,5 Skalenteile bei 320 Volt betrug. Das stärkere Anwachsen des Stromes bei den höheren Potentialdifferenzen kann durch die Mitwirkung der positiven Ionen bei der Stoßionisation[1]) verursacht sein. Dies zeigten noch deutlicher die Versuche in Wasserstoff. Außerdem haben wir ein Gasgemisch vor uns, für welches für höhere Potentialdifferenzen unsere Formeln nicht streng zu gelten brauchen, besonders da die eine Komponente, der Sauerstoff, eine geringe Ionisierungsspannung $V = 23{,}3$ Volt besitzt. Als Wert der mittleren Ionisierungsspannung in Luft ist aus den Beobachtungen für die Potentialdifferenzen $v = 28{,}5$ bis $v = 123$ Volt $V = 27{,}1$ Volt angenommen worden.

2. Als Wert der Stoletowschen Konstanten NV für Luft ergibt sich die Zahl 340. Diese Größe wurde aus den Messungen für die Potentialdifferenzen von 120 Volt bis 285 Volt bestimmt. Für geringere Spannungen ist das Maximum des lichtelektrischen Stromes nicht so scharf ausgeprägt, daß eine genaue Bestimmung des Maximaldruckes p_m möglich wäre. Bei 324 Volt scheint durch die Mitwirkung der positiven Ionen als Ionisatoren das Maximum in Richtung des Minimumpotentials[2]) verschoben zu sein. Das Minimumpotential für Luft ist nach Strutt[3]) 341 Volt. Die Entladung tritt ein, wenn das Produkt aus Druck und Abstand der Platten 0,57 beträgt. Bei demselben Druck und Entfernung würde auch der lichtelektrische Strom sein Maximum, nämlich den Wert ∞, annehmen. Hieraus würde sich für NV der Wert $341/0{,}57 = 598$ ergeben. In diesen Wert muß NV bei Annäherung an das Minimumpotential allmählich übergehen, so daß also obige Verschiebung erklärlich ist.

Der hier gefundene Wert von $NV = 340$ weicht von dem Townsendschen Werte 365 und dem Stoletowschen 372 beträchtlich ab, während die letzteren in guter Übereinstimmung sind. Nun zeigen die weiter unten angeführten Messungen in

1) Ob diese von Townsend nachgewiesene Mitwirkung im Innern des Gases oder beim Auftreffen der positiven Ionen auf das Metall der belichteten Platte stattfindet, bleibe hier dahingestellt.

2) Minimumpotential der Entladung. 3) R. J. Strutt, l. c.

Gasgemischen, daß die Stoletowschen Konstanten für das Gemisch zwischen den Konstanten der Komponenten liegen. Für Stickstoff gibt Townsend $NV = 342$, während in dieser

Fig. 3.

Luft: $v = 121{,}5$ Volt, $l = 0{,}208$ cm
$i_0 = 0{,}83$.
⊙ beobachtet
• berechnet
× nach Townsend berechnet.

Arbeit in guter Übereinstimmung hiermit 346 gefunden wird. Für Sauerstoff ergab sich aus den weiter unten angeführten Messungen $NV = 268$. Der Wert für Luft muß zwischen 346 und 268 liegen. Diese Bedingung erfüllt der von mir bestimmte Wert, während die beiden anderen Werte außerhalb dieser Grenzen fallen.

3. Die Anzahl der Zusammenstöße eines Ions beim Passieren eines Zentimeters Luft beim Drucke 1 mm Hg ist

gleich N. N hat den Wert 12,6. Die freie Weglänge eines Ions beträgt somit unter diesen Bedingungen $1 : 12{,}6 = 0{,}0794$ cm.[1])

4. Auf Grund der für Luft bestimmten Konstanten $N = 12{,}6$, $V = 27{,}1$, $NV = 340$ ist in folgender Tab. 3 aus dem Strom i_0 im äußersten Vakuum der lichtelektrische Strom einmal nach der korrigierten Formel i', das andere Mal nach der Townsendschen Formel i'' berechnet. In Fig. 3 verbindet die ausgezogene Kurve die berechneten Werte i', während die beobachteten Werte zum Vergleich eingetragen sind.

Wie man aus dieser Tabelle ersieht, besteht für Drucke in der Umgebung des Maximums zwischen den berechneten Werten i' und den beobachteten i eine gute Übereinstimmung, wenn man bedenkt, daß die zur Rechnung verwandten Größen i_0, N und V zurzeit nur auf 1—2 Proz. bestimmbar sind. Die nach der Townsendschen Formel bestimmten Ströme i'' zeigen in diesem Gebiete so beträchtliche Abweichungen, daß man die Notwendigkeit der angebrachten Korrektion erkennt.

Tabelle 3.

$v = 121{,}5$ Volt, $l = 0{,}208$ cm, $i_0 = 0{,}83$, $p_m = 1{,}74$ mm Hg.

p	i	i'	i''
7,41	1,02	1,015	1,075
5,64	1,38	1,28	1,45
4,30	1,81	1,67	2,09
3,26	2,23	2,25	2,985
2,48	2,80	2,73	3,82
1,81	2,99	3,00	4,35
1,36	2,93	2,91	4,18
1,05	2,60	2,64	3,68
0,787	2,21	2,29	3,08
0,490	1,66	1,76	2,17
0,260	1,23	1,31	1,49
0,201	1,11	1,19	1,33
0,069	0,91	0,95	0,99
0,024	0,86	0,87	0,88

Für geringere Drucke zeigen sich größere Abweichungen In diesem Falle haben die Ionen im allgemeinen größere

1) Eine Vergleichung mit der mittleren freien Weglänge eines Luftmoleküls findet sich auf p. 41.

Potentialdifferenzen frei durchlaufen, ehe sie mit Molekülen zusammenstoßen. Nun hat Herr Lenard[1]) gezeigt, daß die freie Weglänge der Strahlenquanten um so größer wird, je größer ihre Geschwindigkeit ist. Es werden also bei geringeren Drucken weniger Zusammenstöße stattfinden, als nach unserer Formel zu erwarten sind.

Das Umgekehrte zeigt sich bei höheren Drucken, wo die beobachteten Ströme größer als die berechneten ausfallen. Es scheint, als ob die Townsendsche Formel für die Anzahl der Zusammenstöße

$$\frac{\alpha}{p} = N e^{-\frac{NVp}{X}}$$

einer Korrektion bedürfe, die die Geschwindigkeitsverteilung beim Zusammenstoße berücksichtigt. Hiervon ist in dieser Arbeit abgesehen worden. Es liegen also die Abweichungen, welche die Ströme i' gegen die beobachteten Werte für geringere und höhere Drucke aufweisen, nicht an der angebrachten Korrektion, sondern an Unzulänglichkeiten der Formel:

$$\frac{\alpha}{p} = N e^{-\frac{NVp}{X}}.$$

So hat schon Townsend bemerkt, daß sich für geringe Werte von X/p α/p größer ergibt als nach dieser Formel zu erwarten ist. Dies deckt sich mit der eben gemachten Beobachtung, daß für die hohen Drucke, also für kleine Werte von X/p, größere als die berechneten Ströme gefunden werden.

2. Messungen in Stickstoff.

1. Die mittlere Ionisierungsspannung in Stickstoff beträgt 27,9 Volt. Dieser Wert ist das Mittel der Bestimmungen von V[2]) für die Potentialdifferenzen von 40—124 Volt. Er stimmt gut mit dem Townsendschen Wert 27,6 überein.

2. Die Stoletowsche Konstante hat in Stickstoff den Wert 346. Er ist in guter Übereinstimmung mit dem Townsendschen Werte 342.

---

1) P. Lenard, Ann. d. Phys. **64**. p. 279. 1898.
2) Vgl. Tab. 5.

Einzelne Messungsreihen in Stickstoff.

Tabelle 4.

v = 41,4 Volt, l = 0,208 cm		v = 82,9 Volt, l = 0,208 cm		v = 165,9 Volt, l = 0,208 cm		v = 208,3 Volt, l = 0,208 cm		v = 123,9 Volt, l = 0,052 cm		v = 123,8 Volt, l = 0,104 cm		v = 123,9 Volt, l = 0,416 cm		v = 123,9 Volt, l = 0,832 cm	
p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i
0,004	1,55	6,59	1,47	0,006	0,73	0,025	0,43	0,020	1,59	17,10	1,87	0,002	1,50	3,14	1,32
		3,88	1,93	11,12	0,89	16,80	0,44	19,86	2,58	13,28	2,34	5,62	1,39	1,89	1,72
2,40	1,49	2,93	2,32	8,51	1,24	13,03	0,58	15,38	3,47	10,22	3,14	4,31	1,63	1,45	2,16
1,79	1,62	2,26	2,72	6,52	1,79	9,99	0,94	11,80	4,51	7,82	4,18	3,29	2,08	1,11	3,02
		1,67	3,10	5,00	2,79	7,64	1,55	9,07	5,31	6,02	5,37	2,49	2,76	0,840	3,94
1,37	1,69	1,29	3,18	3,81	3,70	5,90	2,54	6,93	5,67	4,62	6,38	1,86	3,70	0,640	4,80
1,04	1,77	0,980	3,14	2,90	4,58	4,48	3,78	5,30	5,47	3,47	6,74	1,41	4,66	0,487	5,32
0,790	1,84	0,735	2,98	2,22	4,89	3,40	4,77	4,07	4,90	2,64	6,60	1,08	5,34	0,384	5,36
0,589	1,86	0,453	2,55	1,64	4,35	2,63	5,02	2,39	3,57	1,98	5,91	0,817	5,51	0,288	5,03
0,460	1,82	0,252	2,13	1,26	3,76	1,95	4,43	1,13	2,42	1,20	4,38	0,614	5,22	0,211	4,12
				0,840	2,69	1,47	3,45	0,475	1,86	0,568	3,11	0,448	4,36	0,057	2,23
0,336	1,77	0,113	1,84	0,488	1,70	0,962	2,11	0,214	1,66	0,043	1,91	0,073	1,88	0,023	1,77
0,206	1,70	0,038	1,64	0,189	1,06	0,542	1,14	0,084	1,59	0,020	1,88	0,027	1,64	0,013	1,67
				0,057	0,82	0,225	0,64								
0,122	1,63	0,027	1,62	0,025	0,75	0,062	0,47								
i_0 = 1,55		i_0 = 1,55		i_0 = 0,71		i_0 = 0,40		i_0 = 1,56		i_0 = 1,86		i_0 = 1,50		i_0 = 1,50	
i_m = 1,86		i_m = 3,18		i_m = 4,91		i_m = 5,03		i_m = 5,67		i_m = 6,74		i_m = 5,51		i_m = 5,40	
p_m = ~0,63 mm Hg		p_m = ~1,25 mm Hg		p_m = 2,32 mm Hg		p_m = 2,80 mm Hg		p_m = 7,0 mm Hg		p_m = 0,48 mm Hg		p_m = 0,863 mm Hg		p_m = 0,431 mm Hg	

Zusammenstellung der Ergebnisse in Stickstoff.

Tabelle 5.

Potentialdifferenz in Volt v	Plattenabstand in Zentimetern l	Strom im Vakuum i_0	Maximalstrom i_m	$i_m : i_0$	Mittlere Ionisierungsspannung V	Maximaldruck p_m	Stoletowsche Konstante NV
41,4	0,208	1,55	1,86	1,20	27,7	~ 0,63	~ 316
41,3	0,208	1,39	1,63	1,173	28,8	~ 0,62	~ 320
82,9	0,208	1,55	3,18	2,052	28,1	~ 1,25	~ 319
82,5	0,208	1,40	2,91	2,078	27,6	~ 1,19	~ 332
124,2	0,208	1,785	2,64	3,365	28,7	1,70	352
123,4	0,208	1,46	5,325	3,645	27,4	1,73	344
165,9	0,208	0,71	4,91	6,92	26,4	2,32	344
165,2	0,208	0,90	6,34	7,04	26,2	2,30	346
208,3	0,208	0,40	5,03	12,6	26,5	2,80	358
248,5	0,208	0,22	5,35	24,3	25,7	3,45	346
123,9	0,052	1,56	5,67	3,635	27,5	7,00	341
123,8	0,104	1,86	6,74	3,62	27,6	3,58	342
124,1	0,208	1,60	5,48	3,425	28,6	1,70	351
123,9	0,416	1,50	5,51	3,67	27,3	0,863	342
123,9	0,832	1,50	5,40	3,60	27,7	0,431	346

3. Die Anzahl N der Zusammenstöße beim Passieren eines Zentimeters Stickstoff beim Drucke 1 mm Hg ist 12,4. Daraus folgt die freie Weglänge eines Ions zu 0,0807 cm.[1])

4. Die in reinem Stickstoff gewonnenen Werte weichen nicht erheblich von denen in Luft ab. Sauerstoff scheint also hier nicht den Einfluß zu besitzen, den er auf die Ionengeschwindigkeit[2]), das Minimumpotential der Entladung[3]) und auf den Kathodenfall ausübt.[4])

In folgender Tabelle 6[5]) ist mit Hilfe der Konstanten $N = 12{,}4$ und $V = 27{,}9$ wieder wie in Luft i' und i'' berechnet und mit i verglichen. Die Werte von i, i' und i'' sind in Fig. 4 dargestellt.

1) Eine Vergleichung mit der mittleren freien Weglänge eines Stickstoffmoleküls findet sich p. 41.

2) J. Franck, l. c.

3) R. J. Strutt, l. c.

4) E. Warburg, Ann. d. Phys. **40**. p. 1. 1890.

5) Befindet sich auf p. 26.

Die Übereinstimmung zwischen beobachteten und berechneten Werten ist gut zu nennen. Die Abweichungen sind durch die Unsicherheiten von N und V bedingt, so würde z. B. für diese Messungsreihe eine Änderung von V um 2 Proz. von 27,9 auf 27,5 Volt die Abweichung von 4 Proz. beim Maximalstrom verschwinden lassen. Bei höheren Drucken zeigt sich eine bessere Übereinstimmung als in Luft. In Stickstoff scheinen die Abweichungen für die Anzahl der Zusammenstöße, die durch die Formel

$$\frac{\alpha}{p} = Ne^{-\frac{NVp}{X}}$$

gegeben ist, geringer zu sein. Auch das von Townsend gegebene Zahlenmaterial[1]) ergibt für Stickstoff eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung. Bei den niedrigen Drucken zeigen sich dieselben Abweichungen wie in Luft. Auch die anderen noch untersuchten Gase weisen diese Erscheinung auf. Für sie alle gilt die Erklärung, die dafür bei den Messungen in der Luft gegeben wurde.

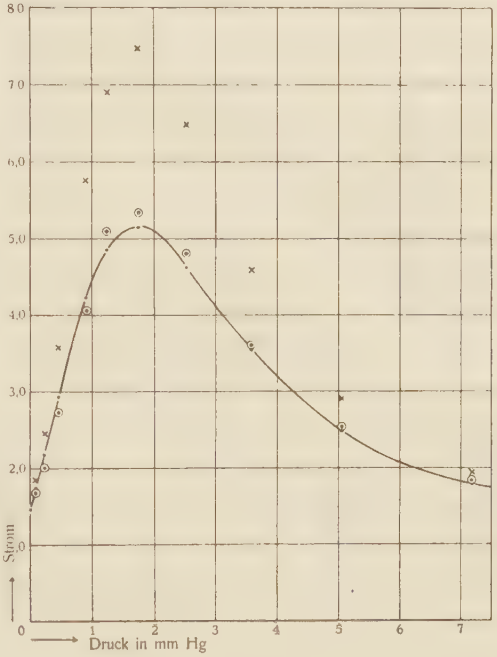


Fig. 4.

Stickstoff: $v = 123{,}4$ Volt, $l = 0{,}208$ cm
$i_0 = 1{,}46$
⊙ beobachtet
• berechnet
× nach Townsend berechnet.

1) J. Townsend, The Theory of Ionization, p. 25.

Tabelle 6.

$v = 123{,}4$ Volt $\quad l = 0{,}208$ cm $\quad i_0 = 1{,}46$ $\quad p_m = 1{,}73$ mm Hg.

p	i	i'	i''
0,010	1,46	—	—
14,18	1,23	—	—
10,62	1,41	—	—
7,18	1,84	1,79	1,94
5,05	2,53	2,48	2,91
3,58	3,61	3,55	4,59
2,54	4,80	4,63	6,48
1,75	5,33	5,14	7,45
1,24	5,09	4,85	6,89
0,900	4,06	4,22	5,76
0,453	2,73	2,92	3,58
0,229	2,01	2,18	2,45
0,096	1,68	1,75	1,84
0,022	1,51	1,53	1,55

3. Messungen in Wasserstoff.

a) Zusammenstellung der Ergebnisse in Wasserstoff.

Tabelle 7.

Potentialdifferenz in Volt v	Plattenabstand in Zentimetern l	Strom im Vakuum i_0	Maximalstrom i_m	$i_m : i_0$	Mittlere Ionisierungsspannung V	Maximaldruck p_m	Stoletowsche Konstante NV
41,8	0,208	1,86	2,15	1,155	26,9	~1,15	~175
82,5	0,208	1,88	3,81	2,028	28,2	~2,73	~145
123,4	0,208	1,735	6,54	3,79	26,7	3,90	152,2
123,3	0,208	1,87	7,05	3,765	26,8	4,03	147,3
164,8	0,208	1,57	11,25	7,16	25,9	5,00	158,6
206,4	0,208	0,60	10,8	18,0	23,3	5,00	198,7 [1])
123,7	0,052	0,410	1,43	3,49	28,1	14,1	168,8 [2])
123,5	0,104	0,410	1,45	3,54	27,8	7,40	160,5 [2])
123,5	0,208	0,366	1,235	3,38	28,7	3,85	154,2
123,5	0,416	0,366	1,25	3,42	28,4	1,92	154,7
123,6	0,832	0,340	1,14	3,35	28,8	1,00	148,5

1) Vgl. p. 28.

2) Diese Werte sind nicht berücksichtigt, da durch die Glimmentladung bei 249 Volt die exakte Einstellung des Plattenabstandes l verloren gegangen war, so daß die Platten repariert werden mußten.

b) Einzelne Messungsreihen in Wasserstoff.

Tabelle 8.

$v = 41{,}8$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 82{,}5$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 123{,}4$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 164{,}8$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 206{,}4$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 123{,}3$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 123{,}5$ Volt $l = 0{,}416$ cm		$v = 123{,}6$ Volt $l = 0{,}832$ cm	
p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i
3,80	1,69	0,008	1,88	13,60	2,29	21,60	1,99	16,98	2,45	16,90	1,84	0,007	0,369	0,005	0,349
2,26	1,99	10,99	1,67	9,71	3,53	16,95	3,05	13,10	4,16	12,95	2,54	10,96	0,314	5,03	0,325
		8,53	2,11	6,92	5,10	13,10	4,56	10,19	6,07	10,10	3,52	8,46	0,384	3,89	0,399
1,69	2,09	6,59	2,63	4,92	6,26	10,10	6,96	7,83	7,93	7,76	4,90	6,56	0,510	3,00	0,533
1,30	2,14	5,02	3,16	3,48	6,47	7,76	9,36	6,07	9,84	5,98	6,15	5,05	0,689	2,28	0,713
1,00	2,14	3,88	3,59	2,50	5,69	6,03	10,80	4,60	10,7	4,61	6,96	3,90	0,895	1,72	0,900
0,760	2,09	2,97	3,79	1,72	4,63	4,63	11,15	3,53	7,99	3,51	6,94	3,00	1,11	1,33	1,06
0,397	2,01	2,28	3,76	1,23	3,66	3,53	10,15	2,74	4,83	2,73	6,32	2,29	1,22	1,02	1,11
0,008	1,86	1,70	3,57	0,853	3,33	2,74	8,09	1,57	1,92	2,03	5,46	1,71	1,24	0,775	1,09
		1,32	3,29	0,456	2,30	1,56	4,66	0,735	0,97	1,54	4,58	1,32	1,13	0,588	0,969
		0,775	2,75	0,214	1,94	0,714	2,66	0,212	0,71	0,930	3,28	0,781	0,853	0,364	0,709
		0,397	2,31	0,019	1,75	0,268	1,87	0,008	0,60	0,387	2,35	0,401	0,586	0,185	0,520
		0,139	2,03			0,011	1,59			0,031	1,89	0,160	0,452	0,085	0,426
		0,045	1,95							0,008	1,88	0,003	0,370	0,009	0,350
$i_0 = 1{,}86$		$i_0 = 1{,}88$		$i_0 = 1{,}735$		$i_0 = 1{,}57$		$i_0 =$ ca. 0,60		$i_0 = 1{,}87$		$i_0 = 0{,}366$		$i_0 = 0{,}340$	
$i_m = 2{,}15$		$i_m = 3{,}81$		$i_m = 6{,}54$		$i_m = 11{,}25$		$i_m = 10{,}8$		$i_m = 7{,}05$		$i_m = 1{,}25$		$i_m = 1{,}14$	
$p_m = \sim 1{,}15$ mm Hg		$p_m = \sim 2{,}73$ mm Hg		$p_m = 3{,}90$ mm Hg		$p_m = 5{,}00$ mm Hg		$p_m = 5{,}00$ mm Hg		$p_m = 4{,}03$ mm Hg		$p_m = 1{,}92$ mm Hg		$p_m = 1{,}00$ mm Hg	

c) Ergebnisse der Tabellen 7 und 8.

1. Die mittlere Ionisierungsspannung V beträgt in Wasserstoff 27,8 Volt, doch zeigen sich bei den einzelnen Messungen ziemliche Abweichungen von diesem Mittelwerte, der aus den

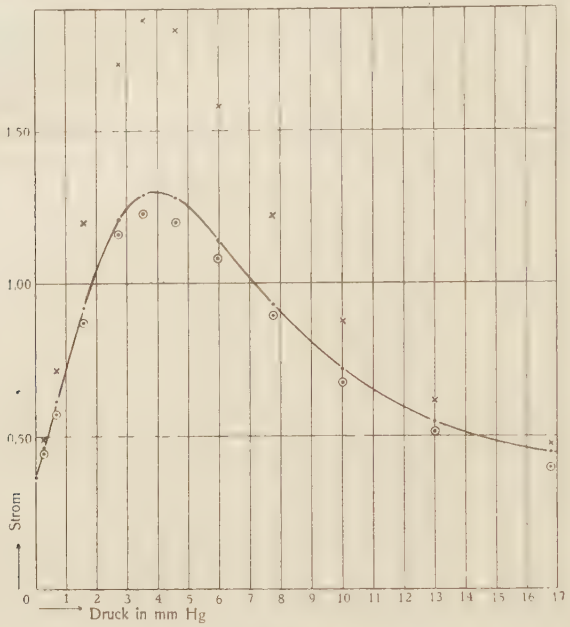


Fig. 5.
Wasserstoff: $v = 123{,}5$ Volt, $l = 0{,}208$ cm
$i_0 = 0{,}366$
⊙ beobachtet
• berechnet
× nach Townsend berechnet.

Beobachtungen für 41,8—123,6 Volt gewonnen ist. Für höhere Spannungen steigt durch die Mitwirkung der positiven Ionen der Strom stark an, woraus sich die geringen Werte für V, 25,9 bei 164,8 Volt und 23,3 bei 206,4 Volt erklären.

2. Die Stoletowsche Konstante NV wurde zu 153 bestimmt als Mittelwert der Messungen für 120 und 160 Volt. Bei 206,4 Volt tritt die schon in Luft beobachtete Verschiebung des Maximums nach dem Minimumpotential der Entladung ein, so daß sich für diese Potentialdifferenz derselbe Maximaldruck p_m ergibt wie für 164,8 Volt.

3. Die Anzahl N der Zusammenstöße eines Ions beim Passieren eines Zentimeters Wasserstoff vom Druck 1 mm Hg ist 5,5. Hieraus folgt die mittlere freie Weglänge unter diesen Bedingungen zu 0,182 cm.[1])

Bei den in Wasserstoff auftretenden Unsicherheiten bei Bestimmung von V und NV werden sich in folgender Tabelle 9 zwischen beobachteten Werten i und berechneten i' größere Abweichungen ergeben. Fig. 5 gibt die Messung graphisch wieder. Zum Vergleich sind hier auch die nach der Townsendschen Formel berechneten Werte i'' eingetragen worden.

Die Abweichungen zwischen beobachteten und berechneten Werten liegen immer in derselben Richtung, sie würden fast ganz verschwinden, wenn für diese Messungsreihe für $V = 27{,}8$ Volt der um 3 Proz. höhere Wert 28,7 Volt genommen würde. Im übrigen gelten dieselben Bemerkungen, wie sie schon bei Luft und Stickstoff gemacht wurden, auch hier.

Tabelle 9.

$v = 123{,}5$ Volt $\quad l = 0{,}208$ cm
$i_0 = 0{,}366$ $\quad p_m = 3{,}85$ mm Hg

p	i	i'	i''
0,010	0,372	—	—
21,60	0,321	—	—
16,80	0,399	0,446	0,472
13,03	0,514	0,546	0,615
10,01	0,673	0,718	0,873
7,77	0,892	0,930	1,22
5,97	1,09	1,14	1,58
4,60	1,20	1,28	1,83
3,52	1,23	1,29	1,86
2,74	1,16	1,21	1,72
1,56	0,87	0,92	1,20
0,698	0,573	0,614	0,714
0,278	0,443	0,462	0,492
0,007	0,369	—	—

1) Eine Vergleichung mit der mittleren freien Weglänge eines Wasserstoffmoleküls findet sich auf p. 41.

4. Messungen in Kohlensäure.

a) Einzelne Messungsreihen.

Tabelle 10.

$v = 41{,}1$ Volt, $l = 0{,}208$ cm		$v = 82{,}3$ Volt, $l = 0{,}208$ cm		$v = 120{,}7$ Volt, $l = 0{,}104$ cm		$v = 162{,}5$ Volt, $l = 0{,}208$ cm	
p	i	p	i	p	i	p	i
0,031	0,302	0,017	0,300	21,62	0,411	0,017	0,211
6,62	0,256	4,74	0,388	16,82	0,504	11,06	0,387
3,91	0,282	3,89	0,441	13,04	0,636	8,55	0,554
		2,96	0,506	10,06	0,812	6,61	0,744
2,30	0,304	2,27	0,574	7,76	1,03	5,02	1,015
1,71	0,320	1,71	0,624	5,99	1,27	3,89	1,31
1,32	0,336	1,30	0,652	4,60	1,44	2,99	1,56
0,998	0,347	0,992	0,647	3,49	1,53	2,28	1,70
0,758	0,352	0,763	0,616	2,69	1,49	1,70	1,66
0,576	0,354	0,575	0,586	2,02	1,36	1,32	1,48
0,351	0,339	0,392	0,500	1,21	0,968	0,827	1,05
0,144	0,319	0,228	0,424	0,440	0,523	0,450	0,575
		0,136	0,376	0,100	0,366	0,231	0,374
0,016	0,301	0,016	0,303	0,011	0,328	0,068	0,257
						0,010	0,211
$i_0 = 0{,}300$		$i_0 = 0{,}297$		$i_0 = 0{,}325$		$i_0 = 0{,}205$	
$i_m = 0{,}355$		$i_m = 0{,}653$		$i_m = 1{,}53$		$i_m = 1{,}72$	
$p_m = \sim 0{,}63$ mm Hg		$p_m = \sim 1{,}23$ mm Hg		$p_m = 3{,}40$ mm Hg		$p_m = 2{,}13$ mm Hg	

$v = 203{,}5$ Volt, $l = 0{,}208$ cm		$v = 244{,}5$ Volt, $l = 0{,}208$ cm		$v = 279{,}9$ Volt, $l = 0{,}208$ cm		$v = 320{,}5$ Volt, $l = 0{,}208$ cm	
16,95	0,226	21,78	0,170	0,005	0,024	0,009	0,010
10,12	0,507	13,02	0,452	16,77	0,133	11,00	0,359
6,02	1,13	7,76	1,18	10,00	0,431	8,48	0,631
4,63	1,53	5,99	1,80	7,71	0,754	6,52	1,01
3,53	1,90	4,60	2,43	5,98	1,15	5,00	1,34
2,74	2,05	3,51	2,84	4,58	1,48	3,82	1,40
2,05	1,99	2,71	2,92	3,50	1,62	2,97	1,23
1,55	1,68	2,01	2,42	2,69	1,42	2,25	0,884
0,917	0,97	1,55	1,83	2,01	1,07	1,68	0,554
0,361	0,327	0,919	0,887	1,53	0,72		
0,092	0,171	0,460	0,324	0,268	0,057		
0,009	0,138	0,155	0,149				
		0,012	0,095				
$i_0 = 0{,}136$		$i_0 = 0{,}090$		$i_0 = \text{ca. } 0{,}023$		$i_0 = \text{ca. } 0{,}010$	
$i_m = 2{,}07$		$i_m = 2{,}97$		$i_m = 1{,}62$		$i_m = 1{,}42$	
$p_m = 2{,}57$ mm Hg		$p_m = 3{,}05$ mm Hg		$p_m = 3{,}55$ mm Hg		$p_m = 4{,}10$ mm Hg	

b) Zusammenstellung der Ergebnisse in Kohlensäure.

Tabelle 11.

Potentialdifferenz in Volt v	Plattenabstand in Zentimetern l	Strom im Vakuum i_0	Maximalstrom i_m	$i_m : i_0$	Mittlere Ionisierungsspannung V	Maximaldruck p_m	Stoletowsche Konstante NV
41,1	0,208	0,300	0,355	1,183	28,2	~0,63	~314
82,3	0,208	0,297	0,653	2,21	26,1	~1,23	~318
123,1	0,208	0,340	1,64	4,82	23,35	1,71	346
162,5	0,208	0,205	1,72	8,39	24,0	2,13	367
203,5	0,208	0,136	2,07	15,2	24,2	2,57	381
244,5	0,208	0,090	2,97	33	23,3	3,05	386
279,9	0,208	0,023	1,62	70,5	22,2	3,55	379
320,5	0,208	0,010	1,42	1,42	22,1	4,10	376
120,7	0,052	0,330	1,53	4,64	23,35	6,90	337
120,7	0,104	0,325	1,53	4,70	23,2	3,40	342
120,7	0,208	0,325	1,51	4,64	23,35	1,72	338

c) Ergebnisse der Tabellen 10 und 11.

1. Die mittlere Ionisierungsspannung V beträgt in Kohlensäure nach den Messungen von 121—244 Volt 23,5 Volt. Townsend gibt hierfür 23,3 Volt. Die Konstanz des Wertes bleibt in Kohlensäure auch für höhere Potentialdifferenzen als 120 Volt erhalten, woraus man folgern kann, daß die Mitwirkung der positiven Ionen bei der Stoßionisation in Kohlensäure weit später als in anderen Gasen einsetzt. Townsend hat dieselbe Beobachtung gemacht. Für die Potentialdifferenzen von 41 und 83 Volt ergibt sich ein höherer Wert für V, d. h. der Maximalstrom erreicht nicht die Höhe, den er für eine mittlere Ionisierungsspannung von 23,5 Volt annehmen müßte. Eine Erklärung für diese Erscheinung kann ich vorläufig nicht geben.

2. Eine weitere Eigentümlichkeit, deren Ursache gleichfalls nicht ohne weiteres ersichtlich ist, bietet die Stoletowsche Konstante NV. Sie steigt mit wachsender Potentialdifferenz, um sich einem konstanten Grenzwerte, ungefähr dem Werte 380, zu nähern. Diese Zahl wurde für Kohlensäure

als Wert von NV angenommen. Daß dieses Anwachsen der Konstanten unabhängig vom Druck und Abstand ist, sondern allein von der Potentialdifferenz abhängt, zeigen die vier Messungen mit 120 Volt, die sämtlich angenähert den Wert 340 geben.

3. Die Anzahl der Zusammenstöße eines Ions beim Passieren eines Zentimeters Kohlensäure beim Drucke 1 mm Hg ist 16,2, die daraus sich ergebende mittlere freie Weglänge 0,0618 cm.[1])

In folgender Tabelle 12 sind wieder die beobachteten und berechneten Werte des lichtelektrischen Stromes nebeneinandergestellt. Zugefügt ist unter der Bezeichnung i''' eine Berechnung des lichtelektrischen Stromes auf Grund der Formel:

$$i = i_0 e^{\alpha l\left(1 - \frac{V}{v}\right)}.$$

Der darin befindliche Wert von α wurde im Gegensatz zur Berechnung von i' nicht aus der theoretischen Formel:

$$\frac{\alpha}{p} = N e^{-\frac{NVp}{X}}$$

entnommen, sondern aus dem von Townsend[2]) experimentell bestimmten Zahlenmaterial.

In Fig. 6 sind die beobachteten und berechneten Werte sämtlich dargestellt.

Man ersieht aus der Tabelle 12 und der zugehörigen Figur, daß zwischen den berechneten Werten i' und den beobachteten Werten i bei hohen Drucken außerordentlich starke Abweichungen vorliegen, daß also in diesem Gebiete die Anzahl der Zusammenstöße α nicht durch die theoretische Formel:

$$\frac{\alpha}{p} = N e^{-\frac{NVp}{X}}$$

darstellbar ist. Man ist also hier auf die direkte Bestimmung von α angewiesen, wie sie Townsend durchgeführt hat. Die auf Grund des Townsendschen Zahlenmaterials berechneten Ströme i''' zeigen für höhere Drucke als der Maximaldruck eine sehr gute Übereinstimmung, für geringere Drucke dagegen

1) Eine Vergleichung mit der mittleren freien Weglänge eines Kohlensäuremoleküls findet sich auf p. 41.

2) Townsend, l. c. p. 19, 20, 25.

ziemliche Abweichungen nach oben, so daß man schließen muß, daß für große Werte von X/p das Townsendsche Zahlen-

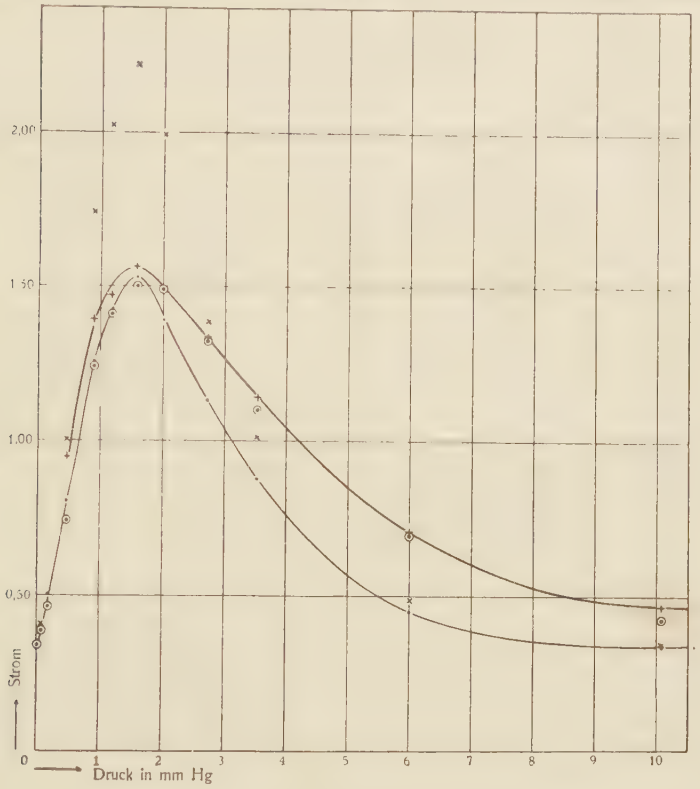


Fig. 6.

Kohlensäure: $v = 120{,}7$ Volt, $l = 0{,}208$ cm
$i_0 = 0{,}325$
⊙ beobachtet
• berechnet
× nach Townsend berechnet
+ nach Formel $i_0 e^{a l \left(1 - \frac{V}{v}\right)}$ berechnet.[1])

material zu hohe Werte von α/p gibt. Da nun Townsend die Konstanten N und V seiner theoretischen Formel so wählt, daß sich für große Werte von X/p Übereinstimmung zwischen beobachteten und berechneten Werten von α/p zeigt, so erklärt es sich leicht, daß die von Townsend gegebenen Zahlen für

1) Die Werte von α sind den Beobachtungen von Townsend entnommen, vgl. p. 32.

N größer als die hier gefundenen ausfallen, so z. B. in Kohlensäure N = 20,0 bzw. 16,2, in Luft N = 14,6 bzw. 12,6.

Tabelle 12.

l = 0,208 cm v = 120,7 Volt i_0 = 0,325 p_m = 1,72 mm Hg

p	i	i'	i''	i'''
16,82	0,310	—	—	—
10,06	0,424	0,338	0,341	0,464
5,99	0,694	0,449	0,484	0,705
3,52	1,10	0,875	1,01	1,14
2,72	1,32	1,13	1,39	1,335
2,02	1,49	1,39	1,99	1,49
1,56	1,50	1,53	2,22	1,56
1,18	1,41	1,42	2,03	1,47
0,902	1,24	1,255	1,74	1,39
0,452	0,743	0,807	1,005	0,945
0,183	0,464	0,504	0,561	—[1]
0,080	0,386	0,400	0,419	—[1]
0,019	0,341	—	—	—

5. Messungen in Sauerstoff.

a) Zusammenstellung der Ergebnisse in Sauerstoff.

Tabelle 13.

Potentialdifferenz in Volt	Plattenabstand in Zentimetern	Strom im Vakuum	Maximalstrom	$i_m : i_0$	Mittlere Ionisierungsspannung	Maximaldruck	Stoletowsche Konstante
v	l	i_0	i_m		V	p_m	NV
40,5	0,208	1,58	1,98	1,253	25,0	~1,0	~195
82,1	0,208	0,865	2,06	2,38	24,4	~1,60	~247
121,7	0,208	0,91	4,16	4,57	24,2	2,18	268
159,4	0,208	0,239	1,825	7,64	24,4	2,90	264
157,5	0,208	0,440	3,50	7,95	23,7	2,75	275,5
200,0	0,208	0,162	2,43	15,0	23,9	3,65	263
241,6	0,208	0,090	2,62	29,1	23,8	4,25	273
121,5	0,104	0,62	2,90	4,68	23,4	4,30	272
121,5	0,208	0,65	3,07	4,73	23,3	2,20	266
121,6	0,416	0,91	4,14	4,55	24,2	1,11	263

1) Für diese hohen Werte von X/p liegen keine Bestimmungen von α durch Townsend vor.

b) Einzelne Messungsreihen in Sauerstoff.

Tabelle 14.

$v = 40{,}5$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 82{,}1$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 159{,}4$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 200{,}0$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 241{,}6$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 121{,}5$ Volt $l = 0{,}104$ cm		$v = 121{,}5$ Volt $l = 0{,}208$ cm		$v = 121{,}6$ Volt $l = 0{,}416$ cm	
p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i
8,89	1,27	0,024	0,891	0,030	0,242	17,94	0,306	0,018	0,091	20,15	0,914	17,05	0,642	0,014	0,954
4,00	1,50	11,84	0,790	17,91	0,286	10,70	0,687	20,96	0,200	12,00	1,54	10,07	0,980	5,91	1,13
2,32	1,76	7,10	1,01	10,71	0,530	8,24	1,10	12,50	0,602	9,17	2,00	7,75	1,27	4,51	1,43
1,32	1,96	5,36	1,21	6,34	1,08	6,37	1,64	7,41	1,67	7,10	2,47	5,99	1,72	3,44	1,91
1,02	1,97	4,10	1,46	4,88	1,47	4,82	2,17	5,70	2,25	5,38	2,81	4,52	2,23	2,63	2,55
0,768	1,97	3,12	1,72	3,73	1,72	3,70	2,43	4,40	2,62	4,16	2,90	3,43	2,77	1,93	3,26
0,582	1,93	2,39	1,93	2,83	1,81	2,88	2,28	3,31	2,42	3,13	2,70	2,64	2,99	1,49	3,86
		1,77	2,05	2,17	1,70	2,11	1,88	2,55	1,90	2,38	2,29	1,96	3,05	1,13	4,14
0,447	1,86	1,38	2,05	1,63	1,43	1,62	1,29	1,77	1,37	1,77	1,94	1,49	2,76	0,875	3,99
0,100	1,62	1,03	1,92	1,26	1,15	0,942	0,724	1,12	0,588	1,03	1,31	1,13	2,35	0,645	3,54
0,024	1,59	0,795	1,74	0,780	0,740	0,360	0,291	0,370	0,165	0,280	0,783	0,869	1,98	0,497	2,93
		0,593	1,54	0,341	0,387	0,084	0,179	0,080	0,098	0,014	0,624	0,412	1,15	0,387	2,42
		0,352	1,26	0,060	0,249	0,018	0,165					0,072	0,738	0,210	1,68
		0,184	1,06	0,022	0,243							0,021	0,67	0,052	1,06
		0,033	0,905											0,012	0,955
$i_0 = 1{,}58$		$i_0 = 0{,}865$		$i_0 = 0{,}239$		$i_0 = 0{,}162$		$i_0 = 0{,}090$		$i_0 = 0{,}62$		$i_0 = 0{,}65$		$i_0 = 0{,}91$	
$i_m = 1{,}98$		$i_m = 2{,}06$		$i_m = 1{,}825$		$i_m = 2{,}43$		$i_m = 2{,}62$		$i_m = 2{,}90$		$i_m = 3{,}07$		$i_m = 4{,}14$	
$p_m = \sim 1{,}0$ mm Hg		$p_m = \sim 1{,}60$ mm Hg		$p_m = 2{,}90$ mm Hg		$p_m = 3{,}65$ mm Hg		$p_m = 4{,}25$ mm Hg		$p_m = 4{,}30$ mm Hg		$p_m = 2{,}20$ mm Hg		$p_m = 1{,}11$ mm Hg	

c) Ergebnisse der Tabellen 13 und 14.

1. Die mittlere Ionisierungsspannung V in Sauerstoff weist einen ziemlich konstanten Wert für die verschiedenen Potentialdifferenzen auf. — Als Mittelwert wurde $V = 23{,}9$ Volt angenommen.

2. Die Stoletowsche Konstante beträgt für Sauerstoff 268.

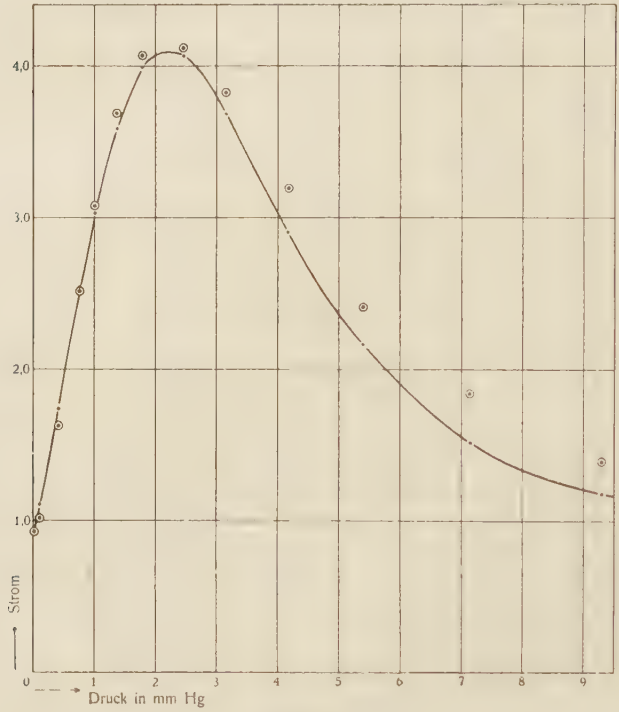


Fig. 7.
Sauerstoff: $v = 121{,}7$ Volt, $l = 0{,}208$ cm
$i_0 = 0{,}91$
⊙ beobachtet
• berechnet.

3. Die Anzahl N der Zusammenstöße eines Ions beim Passieren eines Zentimeters Sauerstoff beim Drucke 1 mm Hg ist 11,2. Daraus ergibt sich die mittlere freie Weglänge eines Ions zu 0,0893 cm.[1])

1) Eine Vergleichung mit der mittleren freien Weglänge eines Sauerstoffmoleküls findet sich auf p. 41.

In folgender Tabelle sind wieder beobachtete und berechnete Werte nebeneinander gestellt. Die graphische Darstellung findet sich in Fig. 7.

Tabelle 15.

$l = 0{,}208$ cm. $v = 121{,}7$ Volt.

p	i	i'	i''
0,014	0,916	—	—
12,10	1,09	1,01	1,02
9,29	1,39	1,17	1,24
7,14	1,84	1,51	1,71
5,40	2,41	2,16	2,65
4,17	3,19	2,90	3,84
3,16	3,83	3,68	5,13
2,46	4,12	4,06	5,86
1,80	4,07	3,99	5,74
1,37	3,67	3,58	4,98
1,03	3,08	3,03	4,06
0,790	2,52	2,54	3,27
0,420	1,63	1,74	2,08
0,110	1,015	1,11	1,16
0,014	0,935	—	—

$i_0 = 0{,}91$ $\quad i_m = 4{,}16$ $\quad p_m = 2{,}18$ mm Hg

Wie man aus der Tabelle ersieht, zeigt sich in Sauerstoff ebenfalls die schon in Kohlensäure bemerkte starke Abweichung der berechneten Werte i' von den beobachteten i für hohe Drucke. Leider liegt bis jetzt noch keine direkte Bestimmung der Zusammenstöße α in Sauerstoff vor, so daß eine Berechnung des lichtelektrischen Stromes, wie sie in Kohlensäure unter der Bezeichnung i''' erfolgte, hier unterbleiben muß. Man kann also nur schließen, daß die Anzahl der Zusammenstöße für geringe Werte von X/p in Sauerstoff nicht durch die einfache Formel:

$$\frac{\alpha}{p} = Ne^{-\frac{NVp}{X}}$$

bestimmbar ist.

6. Messungen in Gasgemischen.

Es kamen Messungen des lichtelektrischen Stromes für eine Potentialdifferenz $v \sim 120$ Volt und den Abstand $l = 0{,}208$ cm

in Stickstoff–Wasserstoff und Wasserstoff–Kohlensäuregemischen zur Ausführung. Der Prozentgehalt des Gemisches wurde folgendermaßen bestimmt:

Eine gewisse Menge des einen Gases wurde in die leergepumpte Anordnung eingelassen. Dann las man den herrschenden Druck am Mc Leod ab. Hierauf ließ man das andere Gas hinzutreten und ermittelte wieder den Druck. Aus den beiden Ablesungen konnte der Prozentgehalt des Gasgemisches berechnet werden.

Vor jeder Messung verstrich eine geraume Zeit, so daß sich die beiden Gase untereinander ausgleichen konnten. In folgender Tabelle sind die Messungen in Stickstoff-Wasserstoffgemischen wiedergegeben.

Tabelle 16.

$v = 123{,}3$ Volt. $l = 0{,}208$ cm.

73,9 % H_2 26,1 % N_2		50,1 % H_2 49,9 % N_2		27,3 % H_2 72,7 % N_2	
p	i	p	i	p	i
14,80	1,87	13,00	1,70	11,10	1,88
11,46	2,46	10,00	2,08	8,52	2,26
8,77	3,37	7,69	2,70	6,60	3,00
6,74	4,59	5,93	3,70	5,00	4,01
5,18	5,93	4,52	4,90	3,82	5,34
3,97	7,04	3,43	6,15	2,92	6,62
3,04	7,43	2,67	6,99	2,26	7,56
2,34	7,20	1,98	7,16	1,68	7,60
1,73	6,30	1,51	6,53	1,29	6,94
1,35	5,30	1,16	5,59	0,785	5,10
0,776	3,65	0,887	4,61	0,426	3,36
0,424	2,68	0,461	3,00	0,177	2,43
0,155	2,15	0,198	2,23	0,015	1,95
0,012	1,93	0,014	1,83		
$p_m = 3{,}05$ mm Hg		$p_m = 2{,}20$ mm Hg		$p_m = 1{,}93$ mm Hg	

Ähnliche Messungsreihen erhielt man in den Gemischen von Kohlensäure und Wasserstoff. Aus diesen Beobachtungen wurde die Stoletowsche Konstante ermittelt und in der folgenden Tabelle 17 und in Fig. 8 in ihrer Abhängigkeit vom Prozentgehalt dargestellt.

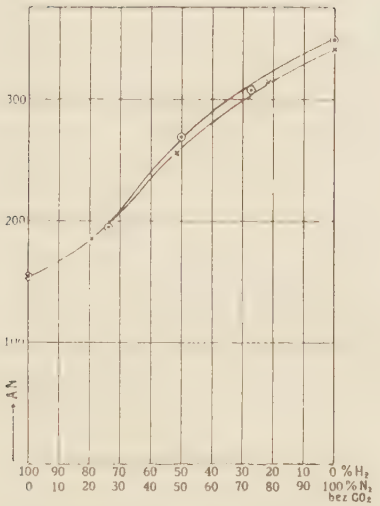


Fig. 8.
⊙ Wasserstoff — Stickstoffgemisch,
× Wasserstoff — Kohlensäuregemisch.

Tabelle 17.

H_2 Prozent	N_2 Prozent	*NV*
100	0	153
73,9	26,1	194,5
50,1	49,9	269
27,3	72,7	307,5
0	100	346

H_2 Prozent	CO_2 Prozent	*NV*
100	0	153
79,4	20,6	184,5
51,7	48,3	255
21,8	78,2	314
0	100	340

Es zeigt sich kein linearer Zusammenhang der Stoletowschen Konstanten mit dem Prozentgehalt. Eine Kurve mit einem Wendepunkte gibt die Abhängigkeit wieder. Vorläufig

wurde davon abgesehen, eine Theorie des lichtelektrischen Stromes in Gasgemischen aufzustellen. Einmal sind die Vorgänge in den reinen Gasen schon ziemlich verwickelter Art, zum anderen läßt sich die Beziehung zwischen mittlerer freier Weglänge der Moleküle und dem Prozentgehalte eines Gasgemisches nicht einfach darstellen, und ähnlich werden auch die Verhältnisse für die mittleren freien Weglängen der Ionen liegen.

§ 6.
Zusammenfassung der Ergebnisse.

1. Der lichtelektrische Strom in Gasen wird, solange nur die negativen Ionen durch Stoß ionisieren, durch die Formel

$$i = i_0 e^{\alpha l \left(1 - \frac{V}{v}\right)}$$

dargestellt. Hierin bedeutet i_0 den Strom im äußersten Vakuum, α die Anzahl der durch Zusammenstöße eines negativen Ions beim Passieren einer Gasstrecke von einem Zentimeter erzeugten Ionen, V die mittlere Ionisierungsspannung des betreffenden Gases, v die angelegte Potentialdifferenz in Volt und l den Abstand der parallelen Kondensatorplatten in Zentimetern.

2. Im allgemeinen gilt die von Townsend aufgestellte Beziehung:

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{X}{p}\right),$$

die für jedes einzelne Gas experimentell zu bestimmen ist.

In Wasserstoff, Stickstoff und Luft läßt sich diese Funktion mit großer Annäherung durch folgende Townsendsche Formel darstellen:

$$\frac{\alpha}{p} = N e^{-\frac{N V p}{X}}.$$

Hierin bezeichnet N die Anzahl der Zusammenstöße eines Ions beim Passieren einer Gasstrecke von einem Zentimeter beim Drucke 1 mm Hg. Der lichtelektrische Strom wird für diese Gase unter den p. 22 angeführten Einschränkungen durch folgende Beziehung wiedergegeben:

$$i = i_0 e^{l\left(1 - \frac{V}{v}\right) p N e^{-\frac{N V l p}{v}}}.$$

In Sauerstoff und Kohlensäure treten bei hohen Drucken starke Abweichungen von dieser Formel auf. In diesen Gasen ist man, da die Beziehung

$$\frac{\alpha}{p} = Ne^{-\frac{NVp}{X}}$$

versagt, auf eine direkte Bestimmung von α angewiesen.

Zieht man das von Townsend[1]) gegebene Zahlenmaterial hinzu, so scheint es, als ob besonders bei den elektronegativen Gasen wie Sauerstoff, Kohlensäure, Chlorwasserstoff und Wasserdampf sich die Unzulänglichkeit der zuletzt angeführten Formel erweist.

3. Die Bestimmung der Konstanten NV, V und N ergab die in folgender Tabelle enthaltenen Werte. Zugleich ist $1/N$, die mittlere freie Weglänge eines Ions beim Drucke von 1 mm Hg, mit der mittleren freien Weglänge L eines Gasmoleküls unter denselben Verhältnissen[2]) verglichen.

Tabelle 18.

	Stoletowsche Konstante NV	Mittlere Ionisierungsspannung V	Stoßzahl der Ionen auf 1 cm bei 1 mm Hg N	Freie Weglänge der Ionen in Zentimetern $\frac{1}{N}$	Freie Weglänge der Molekeln bei 1 mm Hg L	$\frac{1}{N} : L$	$\frac{1}{N} : 4\sqrt{2}L^3$[3])
Luft . . .	340	27,1	12,6	0,0794	0,00745	10,65	1,92
Stickstoff .	346	27,9	12,4	0,0807	0,00734	11,00	1,94
Wasserstoff	153	27,8	5,5	0,182	0,01375	13,22	2,34
Kohlensäure	380	23,5	16,2	0,0618	0,00512	12,07	2,13
Sauerstoff .	268	23,9	11,2	0,0893	0,00794	11,25	1,99

1) Townsend, l. c. p. 24—37.

2) Die benutzten freien Weglängen sind der kinetischen Theorie der Gase von O. E. Meyer entnommen und mit Hilfe der Sutherlandschen Formel auf 20° C umgerechnet, da bei dieser Temperatur die Messungen zur Ausführung gelangten.

3) Die mittlere freie Weglänge verschwindend kleiner, schnell bewegter Körper ist $4\sqrt{2}$ mal so groß als die der Gasmoleküle (vgl. J. C. Maxwell, Phil. Mag. [4] **19.** p. 29. 1860).

Die hier gefundenen Werte von NV weichen von den eingangs[1]) gegebenen Townsendschen Zahlen in einzelnen Fällen beträchtlich ab. Eine Erklärung hierfür ist S. 34 gegeben worden. Geringer sind die Unterschiede bei der mittleren Ionisierungsspannung.

Aus den Werten von NV folgt, daß bei gegebener Potentialdifferenz und gleichbleibendem Abstande das Maximum des lichtelektrischen Stromes zuerst in Wasserstoff, dann in Sauerstoff, Luft, Stickstoff und zuletzt in Kohlensäure erreicht wird, wenn man von höheren zu niederen Drucken übergeht.

Luft, Wasserstoff, Stickstoff weisen fast die gleiche mittlere Ionisierungsspannung auf. Für die elektronegativen Gase Sauerstoff und Kohlensäure reicht eine geringere Energie, die für beide innerhalb der Versuchsfehler denselben Wert hat, zur Stoßionisation aus. Für eine gegebene Potentialdifferenz nimmt also in den zuletzt genannten Gasen der lichtelektrische Strom höhere Maximalwerte an als in Luft, Wasserstoff und Stickstoff. Zieht man zu den hier bestimmten Ionisierungsspannungen noch die von Townsend gefundenen Werte für Wasserdampf $V = 22{,}4$ und Chlorwasserstoff $V = 16{,}5$ hinzu, so kann man schließen, daß die mittlere Ionisierungsspannung um so kleiner ist, je elektronegativer ein Gas sich verhält. Dem steht vorläufig noch entgegen, daß Townsend für die stark elektropositiven Gase Argon und Helium geringe Werte von V erhalten hat, doch könnte dies in der Einatomigkeit ihrer Molekeln begründet liegen. Bemerkenswert ist auch, daß Sauerstoff, Kohlensäure und Wasserdampf[2]) innerhalb der Meßgenauigkeit das gleiche V besitzen. Es ist möglich, daß die Ionisierungsspannung einer Verbindung durch die Ionisierungsspannung des am leichtesten ionisierbaren Elementes bestimmt ist, da beim Ionenstoß sicher Dissoziation eintritt. In dieser Hinsicht werden noch Versuche ausgeführt werden.

Ferner zeigt sich nach obiger Tabelle ein Zusammenhang zwischen der Anzahl N der Zusammenstöße eines Ions und der freien Weglänge einer Gasmolekel. Die freie Weglänge eines Ions ist rund 11 mal so groß als die freie Weglänge

1) p. 5.
2) Nach Townsend $V = 22{,}4$ Volt.

einer Molekel, oder rund 2 mal so groß als die eines verschwindend kleinen, schnell bewegten Körpers. Dies wurde auch von Herrn Lenard[1]) bei Bestimmung der kleinsten Ionisierungsspannung gefunden. Kennt man also die mittlere Ionisierungsspannung eines Gases, so kann man aus ihr und der mittleren freien Weglänge des Gases die Stoletowsche Konstante einfach berechnen.

4. Bei Annäherung an das Minimumpotential der Entladung tritt ein stärkeres Anwachsen des lichtelektrischen Stromes durch Mitwirkung der positiven Ionen ein. Der Maximaldruck p_m des lichtelektrischen Stromes wird in Richtung des „kritischen" Druckes der Glimmentladung verschoben.

Schließlich erfülle ich die angenehme Pflicht, Herrn Geheimrat Dr. Hallwachs und Herrn Privatdozent Dr. Dember für die freundliche Anregung zu dieser Arbeit, sowie für oft gewährte Unterstützung bestens zu danken.

Herrn Prof. Dr. Heydweiller bin ich für die gütige Übernahme des Referates zu Danke verpflichtet.

Dresden, Phys. Inst. d. Tech. Hochschule, im Februar 1912.

---

1) P. Lenard, Ann. d. Phys, 8. p. 190. 1902.

Lebenslauf.

Ich, Arthur Rudolf Paul Partzsch, wurde am 12. April 1887 als Sohn des Baugewerken Adolph Partzsch zu Dresden geboren. Nach fünfjährigem Besuche der Volksschule trat ich Ostern 1898 in die Annenschule, Realgymnasium in Dresden-Altstadt, ein und verließ diese Anstalt Ostern 1907 mit dem Reifezeugnis. Von da ab studierte ich Mathematik und Physik an der Technischen Hochschule zu Dresden. Seit Juli 1911 gehöre ich dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule zu Dresden als Assistent an.